

福建九龙江北溪浮游植物群落分布特征及其影响因子*

田永强 俞超超 王磊 黄邦钦**

(厦门大学环境与生态学院, 福建省海陆界面生态环境重点实验室, 福建厦门 361005)

摘要 分别于2011年枯水期(2月)、丰水期(5月)和平水期(10月)系统调查研究了福建九龙江北溪浮游植物群落组成、丰度的分布特征及其与环境因子的关系。共鉴定浮游植物107种,隶属于7门64属。不同水文期浮游植物主要优势种类不同,枯水期为马索隐藻和梅尼小环藻,丰水期为四尾栅藻和四角十字藻,平水期则演替为微小平裂藻。不同水文期浮游植物丰度变化明显,其平均值依次为枯水期($154.77 \times 10^4 \text{ cells} \cdot \text{L}^{-1}$) > 平水期($76.40 \times 10^4 \text{ cells} \cdot \text{L}^{-1}$) > 丰水期($45.40 \times 10^4 \text{ cells} \cdot \text{L}^{-1}$)。相关分析表明,枯水期和平水期浮游植物丰度与铵态氮($\text{NH}_4^+ - \text{N}$)呈显著正相关,丰水期浮游植物丰度与温度呈极显著正相关。典范对应分析(CCA)表明,水体温度是影响该水域浮游植物分布格局的重要因子,溶解态活性磷浓度也对浮游植物的分布有较大的影响。CCA排序图较好显示了浮游植物物种分布和环境因子之间的关系。

关键词 浮游植物 群落结构 环境因子 典范对应分析 九龙江北溪

文章编号 1001-9332(2012)09-2559-07 中图分类号 X171 文献标识码 A

Dynamic changes of phytoplankton's community structure in Beixi of Jiulongjiang River, Fujian Province of East China and related affecting factors. TIAN Yong-qiang, YU Chao-chao, WANG Lei, HUANG Bang-qin (Fujian Province Key Laboratory of Coastal Ecology and Environmental Studies, College of Environment and Ecology, Xiamen University, Xiamen 361005, Fujian, China). -Chin. J. Appl. Ecol. 2012 23(9): 2559–2565.

Abstract: An investigation was conducted on the phytoplankton's community composition, abundance, and their relations with environmental factors in Beixi of Jiulongjiang River, Fujian Province in February (dry season), May (wet season), and October (normal season), 2011. A total of 107 phytoplankton species were identified, belonging to 64 genera and 7 phyla. The dominant species changed with seasons. *Campylomonas marssoni* and *Cyclotella meneghiniana* dominated in dry season, *Scenedesmus quadricauda* and *Crucigenia tetrapedia* dominated in wet season, and *Merismopedia tenuissima* dominated in normal season. The phytoplankton's abundance was the highest in dry season (averaged $154.77 \times 10^4 \text{ cells} \cdot \text{L}^{-1}$), followed by in normal season ($76.40 \times 10^4 \text{ cells} \cdot \text{L}^{-1}$), and in wet season ($45.40 \times 10^4 \text{ cells} \cdot \text{L}^{-1}$). The abundance in dry and normal seasons was significantly positively correlated with water ammonium nitrogen concentration ($P < 0.05$), while that in wet season was significantly positively correlated with water temperature ($P < 0.01$). Canonical correspondence analysis (CCA) showed that water temperature was the most important factor affecting the phytoplankton's community structure, and dissolved phosphorous concentration also played important role for the community structure. The CCA ordination plots could well display the phytoplankton's community structure and its relationships with environmental factors.

Key words: phytoplankton; community structure; environmental factor; canonical correspondence analysis (CCA); Beixin of Jiulongjiang River.

* 厦门市重大科技平台项目(3502Z20091005)资助。

** 通讯作者。E-mail: bqhuang@xmu.edu.cn

2012-04-05 收稿 2012-06-06 接受。

在淡水生态系统中,浮游植物与环境之间有着十分密切的关系,其种类组成和分布对环境变化具有指示作用,同时,环境条件的改变也直接或间接地影响到浮游植物的群落结构^[1]. 浮游植物因为其多样性的时间和空间分布特征而被视为水质的指示生物之一^[2-3],使用它们监测水质具有简单方便,能快速对环境的变化做出反应,检测的范围较广等优点^[4]. 由于存在地域和水体类型差异,不同河流生态系统中浮游植物群落的组成和动态存在较大的差异^[5]. 因此,有必要对不同地域的水体(特别是饮用水源的水体)进行浮游植物群落特征的调查和研究.

九龙江北溪是厦门市饮用水重要来源,供给厦门岛、集美和海沧等厦门主要城区和经济中心区域,对厦门社会经济发展起着重要的保障作用. 近几年,九龙江水质日益恶化,水华现象有不同程度的发生. 2009 年 1 月底至 2 月中下旬枯水期间,北溪江东库区(包括厦门取水口)长达 20 余 km 河段暴发佩氏拟多甲藻(*Peridiniopsis penardii*)水华. 水华期间水质急剧恶化,严重威胁厦门的饮用水安全. 同时,九龙江北溪水环境安全对福建省乃至海峡西岸经济区也有着重大影响. 因此,探究北溪浮游植物群落分布特征及其影响因素和建立水质安全保障体系具有重要的意义. 本文首次较系统地调查分析了北溪浮游植物群落组成、丰度及其空间分布特征,应用典范对应分析(canonical correspondence analysis, CCA)初步探讨了北溪浮游植物群落与环境因子间的关系,为利用浮游植物进行水质监测工作提供基础数据.

1 研究地区与研究方法

1.1 采样地点及站位

九龙江地跨南亚热带和中亚热带,绝大部分区域属亚热带海洋性季风气候. 气温及降水的时空差异较显著. 北溪是九龙江流域两条主要干流之一,主流发源于龙岩市西北的博平岭山脉梅花山一带,上游称雁石溪,北溪流域面积 9640 km²,河源至河口全长 274 km. 2011 年 2 月(枯水期)、5 月(丰水期)、10 月(平水期)分别对北溪的浮游植物群落特征开展调查研究,沿北溪的河源至河口共设置 15 个采样的站点,站点位置如图 1 所示.

1.2 样品的采集、鉴定和生物量的测定

定性样品采用 20 μm 孔径筛绢制成的浮游生物网,在水面下 0~0.5 m 水层做“∞”状拖取 3 min



图 1 福建九龙江北溪采样站点分布

Fig. 1 Sampling sites in the Beixi, Jiulongjiang River, Fujian.

左右采集,所获得的水样加入福尔马林固定. 定量样品用有机玻璃采水器在表层 0.5 m 处采取 1 L 水样,用鲁格氏试剂固定,在实验室浓缩沉淀. 于光学显微镜下进行鉴定和计数,浮游植物物种鉴定和计数参考有关工具书^[6-9]. 叶绿素 a 浓度的测定参照 Parsons 等^[10]描述的方法,水样使用 25 mm GF/F 滤膜(Whatman)在小于 40 mm Hg 的负压下进行抽滤,在 24 h 内使用荧光分光光度计进行测定,激发和发射波长分别设置为 430 和 670 nm,测定荧光值,计算得到叶绿素 a(Chl a)浓度.

1.3 环境因子的测定

水温(T)、溶解氧(DO)、pH 等环境参数用多参数水质分析仪 WTW Multi-3430 进行现场检测;硝酸盐氮(NO₃⁻-N)采用镉柱还原-萘乙二胺分光光度法测定;亚硝酸盐氮(NO₂⁻-N)采用萘乙二胺分光光度法测定;铵态氮(NH₄⁺-N)采用靛酚蓝分光光度法测定;溶解性磷酸盐(DRP)采用磷钼蓝分光光度法测定. 营养盐数据由厦门大学陈能汪博士提供.

1.4 数据处理

运用 Shannon 多样性指数(H')、Margalef 丰富度指数(d)、Pielou 均匀度指数(J)及优势度(Y)描述北溪浮游植物群落结构特征^[11-12]. 计算公式如下:

$$H' = - \sum_{i=1}^S P_i \ln P_i$$

$$d = (S - 1) / \ln N$$

$$J = H' / \ln S$$

$$Y = n_i / N \times f_i$$

式中: $P_i = n_i / N$; n_i 为第 i 种藻类个体数; N 为藻类总细胞数; S 为藻类物种数; f_i 为第 i 种藻类在各站出现的频率. $Y > 0.02$ 为优势种^[13].

采用线性回归分析浮游植物丰度与各环境因子的相关性. 所有数据统计学分析均在 SPSS 16.0 下完成. 采用 Canoco for Windows 4.5 软件对物种数据和环境数据进行典范对应分析. 物种数据采用浮游植物丰度指标, 按照物种在各样点出现的频度 $> 12.5\%$, 物种在至少一个样点的相对密度 $\geq 1\%$ ^[14] 入选矩阵. 物种矩阵经过 $\lg(x + 1)$ 转换, 环境数据进行 $\lg(x + 1)$ 转换^[15], 排序结果用物种-环境因子关系的双序图表示^[16].

2 结果与分析

2.1 浮游植物种类组成和优势种

3 个水文期共鉴定浮游植物 107 种, 隶属于 7 门 64 属, 群落类群组成以绿藻、硅藻、隐藻和蓝藻为主, 其中绿藻门(Chlorophyta) 种类数最多, 共 26 属 55 种, 其次为硅藻门(Bacillariophyta), 共 21 属 30 种, 第 3 是蓝藻门(Cyanobacteria) 7 属 9 种. 此外, 裸藻门(Euglenophyta) 3 属 4 种, 甲藻门(Dinophyceae) 3 属 3 种, 隐藻门(Cryptophyta) 2 属 4 种, 金藻门(Chrysophyta) 2 属 2 种. 从水文期的变化上看, 平水期鉴定浮游植物 78 种; 丰水期 73 种; 枯水期为 69 种. 不同水文期浮游植物主要优势种类不同, 由枯水期的马索隐藻(*Campylomonas marssoni*) 和梅尼小环藻(*Cyclotella meneghiniana*), 更替为丰水期的四尾栅藻(*Scenedesmus quadricauda*) 和四角十字藻(*Crucigenia tetrapedia*), 到了平水期则演替为微小平裂藻(*Merismopedia tenuissima*) (表 1). 另外, 不同站位浮游植物优势种也不同. 例如, 丰水期时鱼形裸藻(*Euglena pisciformis*) 主要集中在 N_7 、 N_{14} 站点.

2.2 北溪流域浮游植物群落的时空变化

2.2.1 丰度、生物量和群落结构 北溪流域不同水文期浮游植物群落的分布特征不同. 枯水期时, 浮游植物丰度较大, 平均丰度为 $154.77 \times 10^4 \text{ cells} \cdot \text{L}^{-1}$. 上游 $N_1 \sim N_5$ 站点浮游植物群落组成特征一致, 丰度在 $89.53 \times 10^4 \sim 322.60 \times 10^4 \text{ cells} \cdot \text{L}^{-1}$; 中段 $N_6 \sim N_{13}$ 站点浮游植物丰度和群落组成特征相似, 浮游植物丰度在 $27.23 \times 10^4 \sim 69.38 \times 10^4 \text{ cells} \cdot \text{L}^{-1}$, 丰度高值出现在下游 N_{14} 、 N_{15} 站点, 分别为 588.66×10^4 和 $601.64 \times 10^4 \text{ cells} \cdot \text{L}^{-1}$. 浮游植物组成以硅藻、绿藻和隐藻为主, 隐藻的空间变化显著, N_{14} 、 N_{15} 站点隐藻明显增多, 其丰度远高于其他站点

(图 2a). 丰水

表 1 九龙江北溪不同水文期浮游植物优势种和优势度
Table 1 Phytoplankton dominant species and their dominance in the Beixi, Jiulongjiang River

优势种 Dominant species	优势度 Dominance index		
	丰水期 Wet season	枯水期 Dry season	平水期 Normal season
平片针杆藻原变种 <i>Synedra tabulate</i> var. <i>tabulate</i>	0.021	0.035	
梅尼小环藻 <i>Cyclotella meneghiniana</i>		0.085	0.023
颗粒直链藻极狭变种 <i>Melosira granulata</i> var. <i>angustissima</i>	0.063	0.076	0.025
变异直链藻 <i>Melosira varians</i>		0.052	
四尾栅藻 <i>Scenedesmus quadricauda</i>	0.081	0.061	0.048
隆顶栅藻 <i>Scenedesmus protuberans</i>			0.064
胶网藻 <i>Dicysphaerium ehrenbergianum</i>		0.024	
实球藻 <i>Pandorina morum</i>			0.076
四角十字藻 <i>Crucigenia tetrapedia</i>	0.080		
马索隐藻 <i>Campylomonas marssoni</i>	0.070	0.111	0.048
啮蚀隐藻 <i>Cryptomonas erosa</i>			0.056
微小平裂藻 <i>Merismopedia tenuissima</i>	0.054		0.133
鱼形裸藻 <i>Euglena pisciformis</i>	0.034		

时期, 浮游植物平均丰度比枯水期小, 为 $45.40 \times 10^4 \text{ cells} \cdot \text{L}^{-1}$, 浮游植物丰度最大值出现在 N_{14} 站点, 为 $227.92 \times 10^4 \text{ cells} \cdot \text{L}^{-1}$, 其他站点丰度较低, 在 $7.99 \times 10^4 \sim 79.20 \times 10^4 \text{ cells} \cdot \text{L}^{-1}$. 从浮游植物组成上看, 丰水期与枯水期存在着一定的差异. 丰水期时硅藻和隐藻的丰度相对减少, 而蓝藻、裸藻和甲藻的丰度有所增加, 在 N_7 、 N_{14} 站点出现一定数量的裸藻(图 2b). 平水期时, 浮游植物平均丰度为 $76.40 \times 10^4 \text{ cells} \cdot \text{L}^{-1}$, 其中上游站点浮游植物丰度要高于下游站点. 浮游植物组成上以绿藻、蓝藻和硅藻为主, 蓝藻的丰度明显增加, 且上游 $N_1 \sim N_5$ 站点蓝藻丰度较高, 而在中段 N_7 、 N_8 等站点出现较高丰度的甲藻(图 2c).

此外, 浮游植物生物量(Chl a) 在 $0.49 \sim 31.96 \mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$, 不同水文时期浮游植物的平均 Chl a 浓度变化明显: 平水期($11.57 \mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$) $>$ 枯水期($8.62 \mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$) $>$ 丰水期($2.84 \mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$). 总体上, Chl a 的水平分布和变化趋势与丰度变化趋势一致

2.2.2 物种多样性指数 浮游植物物种 Shannon 多样性指数(H')、Margalef 丰富度指数(d)、Pielou 均

匀度指数(J) 三者在不同水文期、不同站点呈现不

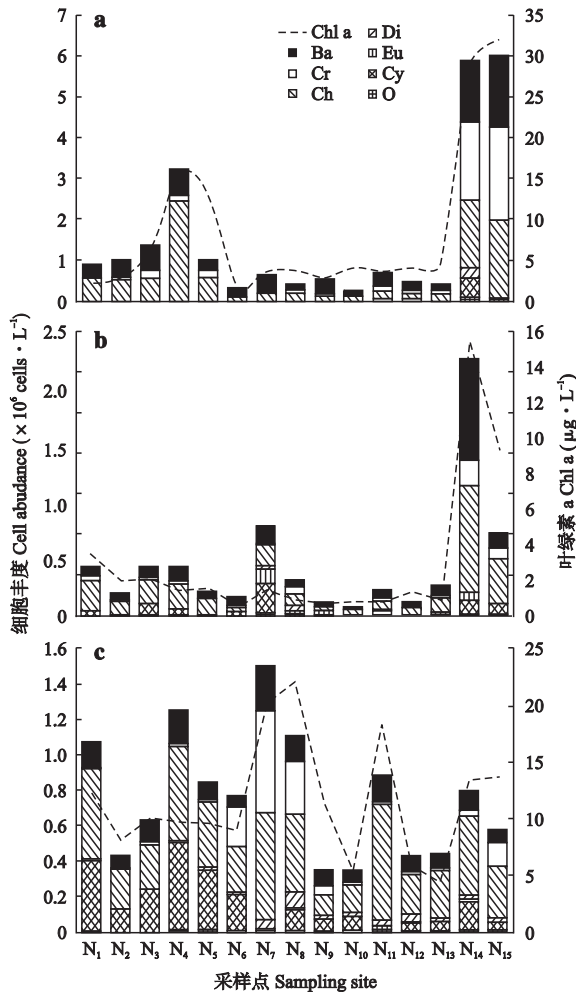


图2 九龙江北溪不同水文期浮游植物生物量(Chl a)、丰度与类群组成

Fig. 2 Phytoplankton biomass (Chl a), abundance and community composition in the Beixi of Jiulongjiang River.

a) 枯水期 Dry season; b) 丰水期 Wet season; c) 平水期 Normal season. 下同 The same below. Ba: 硅藻 Bacillariophyta; Cr: 隐藻 Cryptophyta; Ch: 绿藻 Chlorophyta; Di: 甲藻 Dinophyceae; Eu: 裸藻 Euglenophyta; Cy: 蓝藻 Cyanobacteria; O: 其他藻类 Others.

同变化。 H 和 J 表现出一致的变化趋势,二者的变化范围分别为1.86~2.74和0.61~0.91(图3)。枯水期 H 变化相对较大,其中站点 N_9 、 N_{15} 较低(分别为1.86、1.88),站点 N_7 最高(2.69);平水期 d 变化相对较大,在0.70~2.29,其中上游站点 N_1 ~ N_5 要高于中段和下游站点; J 也是平水期变化相对较大,站点 N_4 最低(0.61),而下游地区站点较高。

2.3 浮游植物与环境因子的关系

对不同水文期的环境因子进行独立样本 t 检验,结果表明:枯水期检测的各环境因子与丰水期和平水期的环境因子之间差异显著,而丰水期和平水期检测的营养盐差异不显著。

根据浮游植物出现频率和相对丰度,选取了19

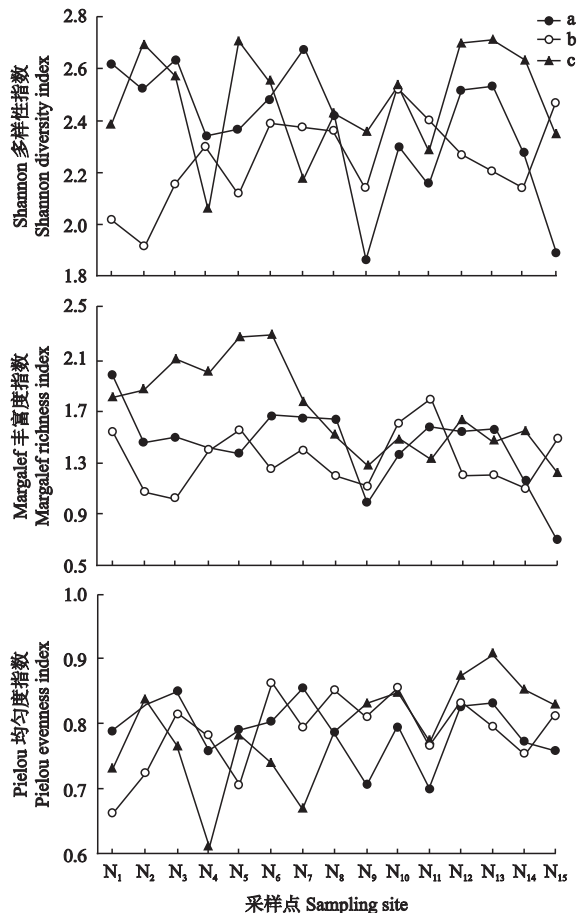


图3 九龙江北溪不同水文期浮游植物多样性、丰富度、均匀度指数的变化

Fig. 3 Variations of Shannon, Margalef and Pielou indices of phytoplankton in different periods in the Beixi of Jiulongjiang River.

种浮游植物属用于CCA分析,分析结果中,第一、第二排序轴的特征值分别为0.368和0.191,环境因子轴与物种排序轴之间的相关系数分别为0.783和0.652(表2)。物种变异积累百分数分别为23.7%和36.0%;物种-环境变异积累百分数分别为62.1%和86.3%;两个物种排序轴近似垂直,相关系数为-0.025,两个环境排序轴的相关系数为0(表2),说明了排序结果可靠^[17],排序轴与环境因子间线性结合的程度较好地反映了物种与环境之间的关系。经CCA软件自动筛选分析可知,水体的水温、铵态氮、亚硝酸盐氮和溶解性磷酸盐是影响北溪浮游植物结构的主要因子。

3 讨论

3.1 基于浮游植物物种多样性与优势种的北溪水质评价

物种多样性是群落的重要特征之一,反映了物

表2 CCA 前2个排序轴和5个主要环境因子的相关系数

Table 2 Correlation coefficients of five environmental factors with the first two axes of CCA

	SP1	SP2	EN1	EN2	T	NO ₃ ⁻ -N	NO ₂ ⁻ -N	NH ₄ ⁺ -N	DRP
SP2	-0.025	1							
EN1	0.783*	0.000	1						
EN2	0.000	0.651*	0.000	1					
T	0.709*	-0.227	0.905*	-0.348	1				
NO ₃ ⁻ -N	-0.237	0.430*	-0.303	0.661*	0.326	1			
NO ₂ ⁻ -N	0.260	0.509*	0.332	0.783*	0.652*	0.681*	1		
NH ₄ ⁺ -N	0.215	0.617*	0.275	0.948*	0.615*	0.561*	0.922*	1	
DRP	0.209	0.588*	0.267	0.904*	0.630*	0.464*	0.929*	0.980*	1

* $P < 0.05$. SP1: 物种排序轴 1 Species axis 1; SP2: 物种排序轴 2 Species axis 2; EN1: 环境因子排序轴 1 Environmental variables axis 1; EN2: 环境因子排序轴 2 Environmental variables axis 2; T: 水温 Water temperature; NO₃⁻-N: 硝酸盐氮 Nitrate N; NO₂⁻-N: 亚硝酸盐氮 Nitrite N; NH₄⁺-N: 铵态氮 Ammonium N; DRP: 溶解性磷酸盐 Soluble reactive phosphorus.

种组成和个体丰度特征. 一般而言, 种类越多或各物种间比例越均匀, 群落物种的 H' 值越大. 物种多样性也是反映水体营养状况的重要参数, 浮游植物的优势种群及群落结构特征指数的变化可在一定程度上反映环境的变化. 生物水质监测中浮游植物的 H' 值 0~1 为重污染, 1~2 为 α -中污染, 2~3 为 β -中污染, >3 为寡污染^[18]. 九龙江北溪浮游植物的 H' 变化范围在 1.86~2.74, 故整体处于 α - β -中污染状态. 另外, 从浮游植物优势种上看, 北溪枯水期优势种马索隐藻、梅尼小环藻和丰水期的优势种四尾栅藻都是中污带的指示生物^[19-20]. 这进一步证实了北溪水质处于 α - β -中污染状态, 水质已经受到一定程度的污染.

3.2 不同水文期浮游植物丰度水平分布的影响因素

相关性分析表明, 北溪枯水期和平水期浮游植物丰度与铵态氮显著正相关(图4), 而丰水期浮游植物丰度与水温极显著正相关. 枯水期时, 北溪上游站点污染严重, 以铵态氮为主, 铵态氮浓度较高是造成上游段 $N_1 \sim N_5$ 站点浮游植物丰度较高的主要原因. 随着双洋溪和新桥溪等支流的汇入(图1), 北溪中段 $N_6 \sim N_{13}$ 站点水质得以改善, 浮游植物的丰度明显降低. 而沿程城镇的污染输入和污染较为严重的支流龙津溪和马洋溪的汇入, 可能是北溪下游 $N_{14} \sim N_{15}$ 站点浮游植物丰度出现高值的原因. 丰水期时, 北溪水体的营养盐较充足, 温度是浮游植物水平分布的主要影响因素, $N_{14} \sim N_7$ 站点的水温较高, 浮游植物丰度也相应较大. 丰水期时降水量增加, 导致水库水力滞留时间减少, 水流速度增加, 而浮游植物的水平分布受水流的影响很大^[21-22], 较快的水流不利于浮游植物生物量的积累, 这可能是丰水期时浮

游植物平均丰度比枯水期小的原因. 此外, 平水期上游较高的铵态氮污染也是其浮游植物丰度高于下游的主要原因.

3.3 浮游植物群落结构与环境因子的关系

典范对应分析是一种非线性的分析方法. 它把对应分析与多元回归结合起来^[17], 可以结合多个环境因子, 从而更好地反映浮游植物群落与环境因子的关系. 目前在湖泊和河流浮游生物的生态研究中

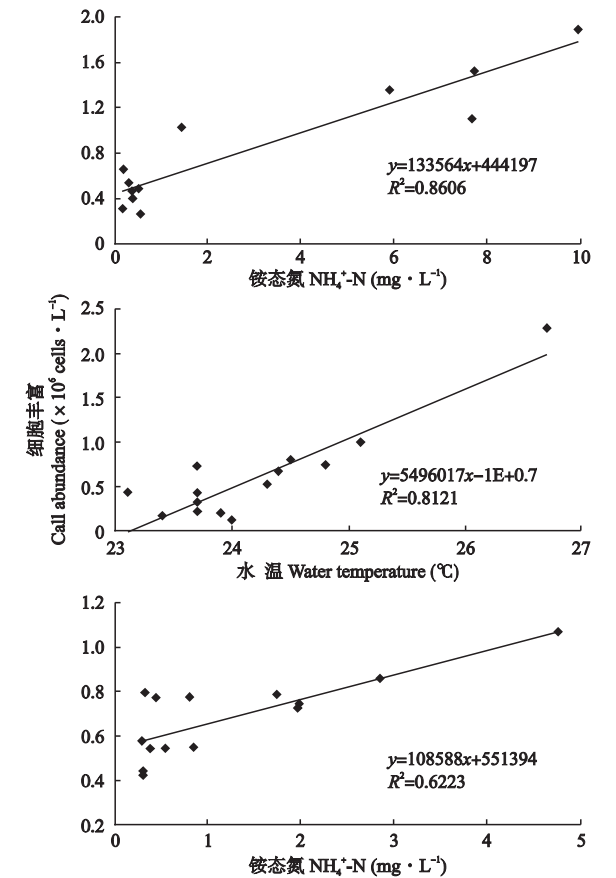


图4 九龙江北溪不同水文期浮游植物丰度与环境因子的关系

Fig. 4 Correlations between phytoplankton abundance and environmental variables in the Beixi of Jiulongjiang River.

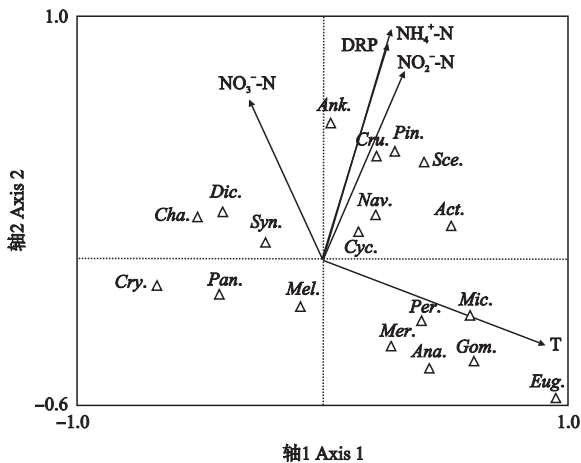


图5 九龙江北溪主要浮游植物属与环境变量之间的 CCA 排序图

Fig. 5 Ordination biplots of main phytoplankton genus and environmental variables in the Beixi of Jiulongjiang River.

Cyc.: 小环藻 *Cyclotella*; Mel.: 直链藻 *Melosira*; Syn.: 针杆藻 *Synedra*; Pin.: 羽纹藻 *Pinnularia*; Gom.: 异极藻 *Gomphonema*; Nav.: 舟形藻 *Navicula*; Cry.: 隐藻 *Cryptomonas*; Sce.: 栅藻 *Scenedesmus*; Cha.: 衣藻 *Chlamydomonas*; Ank.: 纤维藻 *Ankistrodesmus*; Pan.: 实球藻 *Pandorina*; Act.: 集星藻 *Actinastrum*; Cru.: 十字藻 *Crucigenia*; Dic.: 胶网藻 *Dictyosphaerium*; Per.: 拟多甲藻 *peridiniopsis*; Eug.: 裸藻 *Euglena*; Mer.: 平裂藻 *Merismopedia*; Mic.: 微囊藻 *Microcystis*; Ana.: 鱼腥藻 *Anabaena*. $\text{NO}_3^- - \text{N}$: 硝酸盐氮 Nitrate N; $\text{NO}_2^- - \text{N}$: 亚硝酸盐氮 Nitrite N; $\text{NH}_4^+ - \text{N}$: 铵态氮 Ammonium N; DRP: 溶解性磷酸盐 Soluble reactive phosphorus.

已经被广泛应用^[23]. 图5反映了北溪浮游植物主要的属与环境因子间的关系. 从第一排序轴上看, 位于右下方的拟多甲藻、微囊藻、平裂藻、鱼腥藻、异极藻、裸藻与水温较好的正向关联, 说明这些藻类分布在相对较高水温的环境. 温度对藻类生命活动的影响主要通过控制光合作用的酶促反应或呼吸作用强度, 直接影响藻类的生长, 并且通过控制各种理化过程间接影响藻类的生长^[24]. 水温的升高有利于绿藻和蓝藻的生长^[25]. 其中, 微囊藻、平裂藻和鱼腥藻属于蓝藻, 蓝藻的生长需要较高的温度, 最适温度为 25 ~ 35 °C, 15 °C 以下其生长会受到限制, 难以成为优势种^[26-27]. 因此, 水温是北溪浮游植物丰水期和平水期蓝藻丰度增多的主要原因. 左下方的隐藻和实球藻与水温有着反向关联, 表明它们喜欢相对较低水温的生境. 而隐藻通常是冬季的主要优势类群, 适宜在温度较低、中等的湍流环境中生长^[28]. 从第二排序轴可以看出, 右上方的栅藻、十字藻、纤维藻、集星藻、羽纹藻、舟形藻与铵态氮、溶解性磷酸盐、亚硝氮为正向关联, 说明这些物种对营养盐的需求较

高. 栅藻、纤维藻、十字藻等小型绿藻的新陈代谢速度较快, 属于能迅速吸收营养盐并进行繁殖生长的种类^[29]. 因此, 它们在较高营养盐条件下可以形成较高的相对丰度.

4 结 论

调查期间九龙江北溪浮游植物生物量 (Chl a) 在 0.49 ~ 31.96 $\mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$, 根据浮游植物多样性和指示物种调查结果判断九龙江北溪为中污染型水体. 3 次水文期共检出浮游植物 7 门 64 属 107 种, 主要由绿藻、硅藻、隐藻和蓝藻组成, 且绿藻 > 硅藻 > 蓝藻 > 隐藻. 浮游植物丰度变化明显, 为枯水期 > 平水期 > 丰水期; 另外, 浮游植物群落结构的时空差异大. 枯水期优势种为隐藻门的马索隐藻和硅藻门的梅尼小环藻, 丰水期为绿藻门的四尾栅藻和四角十字藻, 平水期则为蓝藻门的微小平裂藻. 各水文期沿着北溪的河源至河口, 浮游植物群落结构存在区域差异性, 上游段 ($N_1 \sim N_5$)、中游段 ($N_6 \sim N_{13}$) 和下游段 ($N_{14} \sim N_{15}$) 3 个区段之间浮游植物的群落结构差异较大. 水温是浮游植物群落时空分布的主要影响因子, 溶解态活性磷浓度对浮游植物的分布也有较大影响.

致谢 本文的营养盐数据由厦门大学陈能汪博士提供, 特此致谢!

参考文献

- [1] Lepistö L, Holopainen AL, Vuoristo H. Type-specific and indicator taxa of phytoplankton as a quality criterion for assessing the ecological status of Finnish boreal lakes. *Limnologia*, 2004, **34**: 236 - 248
- [2] Coste M, Bosca C, Dauta A. Use of algae for monitoring rivers in France // Whitton BA, Rotte E, Friedrich G, eds. Use of Algae for Monitoring Rivers. Innsbruck: Institut für Botanik, Universität Innsbruck, 1991: 75 - 88
- [3] Prygiel J. Use of benthic diatoms in surveillance of the Artois-Picardie Basin hydrological quality // Whitton BA, Rotte E, Friedrich G, eds. Use of Algae for Monitoring Rivers. Innsbruck: Institut für Botanik, Universität Innsbruck, 1991: 89 - 96
- [4] Nwankwo DI, Akinsoji A. Epiphyte community of water hyacinth, *Eichhornia crassipes* (Mart) Solms in coastal waters of southwestern Nigeria. *Archiv für Hydrobiologie*, 1992, **124**: 501 - 511
- [5] Zhao M-X (赵孟绪), Lei L-M (雷腊梅), Han B-P (韩博平). Seasonal change in phytoplankton communities in Tangxi Reservoir and the effecting factors. *Journal of Tropical and Subtropical Botany* (热带亚热带植物学报), 2005, **13**(5): 386 - 392 (in Chinese)
- [6] Jin X-C (金相灿), Tu Q-Y (屠清瑛). Criterion for

- Investigation of Eutrophication of Lakes. Beijing: China Environmental Science Press, 1990 (in Chinese)
- [7] Zhang Z-S (章宗涉), Huang X-F (黄祥飞). Research Methods for Freshwater Plankton. Beijing: Science Press, 1991 (in Chinese)
- [8] Hu H-J (胡鸿钧), Wei Y-X (魏印心). The Fresh water Algae of China: Systematics, Taxonomy and Ecology. Beijing: Science Press, 2006 (in Chinese)
- [9] Zhou F-X (周凤霞), Chen J-H (陈剑虹). Atlas of Microbiology in Freshwater. Beijing: Chemical Industry Press, 2010 (in Chinese)
- [10] Parsons TR, Maita Y, Lalli CM. A Manual of Chemical and Biological Methods for Seawater Analysis. New York: Pergamon Press, 1984: 78 – 83
- [11] Belaussoff S, Kevan PG, Murphy S, *et al.* Assessing tillage disturbance on assemblages of ground beetles (Coleoptera: Carabidae) by using a range of ecological indices. *Biodiversity and Conservation*, 2003, **12**: 851 – 882
- [12] Hunter PR, Gaston MA. Numerical index of the discriminatory ability of typing systems: An application of Simpson's index of diversity. *Journal of Clinical Microbiology*, 1988, **26**: 2465 – 2466
- [13] Zhang T (张婷), Li L (李林), Song L-R (宋立荣). Annual dynamics of phytoplankton abundance and community structure in the Xionghe Reservoir. *Acta Ecologica Sinica* (生态学报), 2009, **29**(6): 2971 – 2979 (in Chinese)
- [14] Lopes MRM, Bicudo CEM, Ferragut MC. Short term spatial and temporal variation of phytoplankton in a shallow tropical oligotrophic reservoir, southeast Brazil. *Hydrobiologia*, 2005, **542**: 235 – 247
- [15] Flores LN, Barone R. Phytoplankton dynamics in two reservoirs with different trophic state (Lake Rosamarina and Lake Arancio, Sicily, Italy). *Hydrobiologia*, 1998, **369/370**: 163 – 178
- [16] Ng SL, Sin FS. A diatom model for inferring sea level change in the coastal waters of Hong Kong. *Journal of Paleolimnology*, 2003, **30**: 427 – 440
- [17] Ter Braak CJF. Canonical correspondence analysis: A new eigenvector technique for multivariate direct gradient analysis. *Ecology*, 1986, **67**: 1167 – 1179
- [18] Shen Y-F (沈韞芬), Zhang Z-S (章宗涉), Gong X-J (龚循矩), *et al.* Modern Biomonitoring Techniques Using Freshwater Microbiota. Beijing: China Architecture & Building Press, 1990: 136 (in Chinese)
- [19] Bohuslav FOTT. Trans. Luo D-A (罗迪安). Algology. Shanghai: Shanghai Science and Technology Press, 1980: 120 – 135 (in Chinese)
- [20] Kuang Q-J (况琪军), Ma P-M (马沛明), Hu Z-Y (胡征宇), *et al.* Study on the evaluation and treatment of lake eutrophication by means of algae biology. *Journal of Safety and Environment* (安全与环境学报), 2005, **5**(2): 87 – 91 (in Chinese)
- [21] Dai M (戴明), Li C-H (李纯厚), Jia X-P (贾晓平), *et al.* Ecological characteristics of phytoplankton in coastal area of Pearl River estuary. *Chinese Journal of Applied Ecology* (应用生态学报), 2001, **15**(3): 1389 – 1394 (in Chinese)
- [22] Wu N-C (吴乃成), Tan T (唐涛), Cai Q-H (蔡庆华), *et al.* Influence of cascaded exploitation of small hydropower on phytoplankton in Xiangxi River. *Chinese Journal of Applied Ecology* (应用生态学报), 2007, **18**(5): 1091 – 1096 (in Chinese)
- [23] Habib OA, Tippet R, Murphy KJ. Seasonal changes in phytoplankton community structure in relation to physico-chemical factors in Loch Lomond, Scotland. *Hydrobiologia*, 1997, **350**: 63 – 79
- [24] Blinn DW. Diatom community structure along physico-chemical gradients in saline lakes. *Ecology*, 1993, **74**: 1246 – 1263
- [25] Nalewajko C, Murphy TP. Effects of temperature, and availability of nitrogen and phosphorus on the abundance of Anabaena and Microcystis in Lake Biwa, Japan: An experimental approach. *Limnology*, 2001, **2**: 45 – 48
- [26] Robarts RD, Zohary T. Temperature effects on photosynthetic capacity, respiration, and growth rates of bloom-forming cyanobacteria. *New Zealand Journal of Marine and Freshwater Research*, 1987, **21**: 391 – 399
- [27] Konopka AE, Brock TD. Effect of temperature on blue-green algae (Cyanobacteria) in lake Mendota. *Applied and Environmental Microbiology*, 1978, **36**: 572 – 576
- [28] Dos Santos ACA, Calijuri MC. Survival strategies of some species of the phytoplankton community in the Barra Bonita Reservoir (São Paulo, Brazil). *Hydrobiologia*, 1998, **367**: 139 – 151
- [29] Sandgren CD. Growth and Reproductive Strategies of Freshwater Phytoplankton. Cambridge: Cambridge University Press, 1988: 442

作者简介 田永强,男,1977年生,博士研究生.主要从事浮游植物生态学研究. E-mail: harpman@yahoo.cn

责任编辑 肖红